

基于SAC算法的直流送端系统暂态电压 稳定策略研究

全芷莹¹,陈冠熹¹,胡轩林¹,林炯涛¹,王裕¹,陈思哲¹,陈兵²

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006;

2. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:随着高比例风电接入直流系统送端,直流送端电压稳定问题面临新的挑战。换相失败后引发的直流送端电压稳定问题呈现“先低后高”的变化趋势,在出现无功不平衡的同时,还伴随着直流输送有功功率的大幅波动,若不对风电机组暂态期间有功出力进行控制,还可能出现有功过剩问题,加剧暂态过电压,对暂态电压稳定性产生不利影响。为此,设计了一种基于柔性动作评价(SAC)算法的暂态电压稳定控制策略。该策略将直流电压、直流电流和送端换流母线电压作为状态量,将风电机组的有功和无功出力指令值作为动作量,充分考虑了直流系统动态特性与直流送端有功、无功出力的协调配合。同时,设计了能兼顾暂态低电压与过电压问题的奖励函数,促进SAC智能体寻找到最优控制策略,能够对暂态低电压与过电压问题均进行有效抑制。通过构建Python+Matlab+PSCAD的联合仿真平台,验证了该控制策略的可行性,可为实际工程应用提供理论依据和技术支持。

关键词:高比例风电;直流送端系统;换相失败;SAC算法;暂态电压稳定控制

中图分类号:TM73 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26958

Research on Transient Voltage Stability Strategy for DC Sending-end System Based on SAC Method

QUAN Zhiying¹, CHEN Guanxi¹, HU Xuanlin¹, LIN Jiongtao¹, WANG Yu¹, CHEN Sizhe¹, CHEN Bing²

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

2. Jiangsu Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: With the high penetration of wind power integration into the sending-end of DC transmission systems, DC sending-end voltage stability issues face new challenges. The DC sending-end voltage stability problems triggered by commutation failures exhibit a "low-first-then-high" variation trend. While reactive power imbalance occurs, it is also accompanied by significant fluctuations in DC transmitted active power. If the active power output of wind turbines during transient periods is not controlled, active power surplus may occur, exacerbating transient over-voltage and adversely affecting transient voltage stability. Therefore, a transient voltage stability control strategy based on the soft actor-critic (SAC) algorithm was designed. The strategy taken DC voltage, DC current, and sending-end converter bus voltage as state variables, and used active and reactive power command values of wind turbines as action variables, fully considering the coordination between DC system dynamic characteristics and active/reactive power output at the DC sending-end. Meanwhile, a reward function that simultaneously addresses both transient low voltage and overvoltage issues was designed to facilitate the SAC agent in finding optimal control strategies, enabling effective suppression of both transient low voltage and overvoltage problems. The feasibility of the proposed control strategy was validated through a co-simulation platform combining Python, Matlab, and PSCAD, providing theoretical foundation and technical support for practical engineering applications.

Key words: high penetration of wind power integration; DC sending-end system; commutation failure; soft actor-critic (SAC) algorithm; transient voltage stability control

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52377169);广东省自然科学基金项目(2023A1515240082, 2023A1515011041);

国家重点研发计划项目(2024YFB4206900, 2024YFB4206901)

作者简介:全芷莹(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统电压稳定性,Email:quan_zying@sina.com

通讯作者:林炯涛(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统分析与控制,Email:linjiongtao@sina.com

2020年,我国提出“双碳”战略目标,为实现这一目标,构建多元互补的综合能源供给体系,加速新能源对传统化石能源的替代,成为我国能源战略的核心方向。在新能源资源储备上,我国拥有丰富的风能资源,近年来,我国风电装机量持续上升,截至2020年底,我国风电装机突破250 GW,装机增量已接近高比例渗透阶段,新能源出力的间歇性、电力电子器件的应用开始对电网整体的稳定性产生影响^[1-3]。

由于我国能源分布不均匀,用电中心与风电富集区呈现逆向分布,风能资源主要存在于直流输电系统送端,通过高压直流输电进行外送消纳。换相失败作为直流输电工程运行中最常发生的故障,会导致直流送端产生电压稳定问题,高比例风电的接入则使得电压问题变得更为复杂,其暂态电压稳定需进一步考虑直流系统控制和风电机组控制特性^[4]。围绕换相失败引发的直流送端电压稳定问题,国内外学者已开展了大量研究。文献[5-7]对换相失败引起的暂态电压问题进行了分析,发现其具有“先低后高”的特点,认为暂态电压问题由换相失败期间直流系统控制引发的无功不平衡引起。为解决上述问题,目前解决方案主要分为三类:优化直流控制、优化辅助设备配置和优化风电控制。

文献[8-10]通过优化直流控制来优化暂态电压,分别通过调节低压限流环节的电流指令值、调整整流器触发角、优化熄弧角控制等方法,通过改变换相失败期间直流系统消耗的无功功率,促使送端交流系统与直流系统无功平衡的方式来优化暂态电压,但上述方法需要确保各控制环节的相互协调,在实现针对不同故障程度进行精确调配上存在难度。文献[11-14]通过优化辅助设备配置来调整无功不平衡以优化暂态电压,研究表明优化辅助设备配置不仅能够有效改善暂态电压,还能提升系统电压支撑强度,但优化辅助设备配置不可避免要考虑经济投资以及已投运工程的再规划,而现有研究普遍以改善暂态电压作为单一的优化目标,忽略了经济成本等问题。

在高比例风电接入直流送端的背景之下,优化风电机组控制也受到广泛关注。文献[15-17]分别对转子侧变流器、网侧变流器的PI控制参数对暂态过电压的影响进行了分析,认为减小比例系数、增大积分系数可有效抑制暂态过电压;文献[18-19]对风电机组低穿、高穿过程中的有功、

无功控制参数对暂态过电压的影响进行了分析;文献[20]考虑到了风电机组功率指令下达与功率响应之间的延迟,提出了一种风电机组功率指令的延迟补偿策略,以抑制由于电压检测存在延迟而引发的过电压;文献[21]考虑到了系统无功需求及风电机组低电压穿越期间无功补偿策略的不合理性,对风电机组故障穿越策略进行了改进。总体而言,现有研究主要关注过电压问题及无功协调,对低电压问题及有功协调关注较少。

然而,直流系统换相失败过程在涉及无功不平衡问题的同时,还伴随着直流输送有功功率的大幅波动,若不对风电机组暂态期间的有功出力加以控制,将可能由于有功过剩而加剧过电压,甚至阻碍故障恢复过程,对送端、受端电力系统稳定性产生巨大影响。

有鉴于此,本文将综合考虑直流送端有功、无功的动态平衡过程,提出将深度强化学习柔性动作评价(soft actor-critic, SAC)算法应用于换相失败后直流送端暂态电压稳定控制中。一方面,基于直流系统动态特性和暂态电压对风电机组有功、无功出力进行协调控制,同时兼顾交直流系统无功不平衡和直流输送有功功率波动;另一方面,建立了兼顾低电压和过电压的奖励函数,使本方法同时适用于暂态低电压和过电压问题。最后,建立了Python+Matlab+PSCAD/EMTDC联合仿真平台,通过算例验证了所提策略的可行性与优越性,结果表明该策略能够有效抑制直流换相失败后产生的暂态低电压与过电压,提升系统的稳定性与恢复能力,为暂态电压稳定问题提供了一个新的解决思路。

1 换相失败后的直流送端电压稳定分析

1.1 高比例风电直流送出系统分析

直流输电由于其损耗小、调节性能优异的特性,在远距离、大容量输电中具有显著技术优势,在现代电力系统中得到广泛应用。其中,换流站是实现交直流能量双向变换的核心环节,是直流系统不可或缺的一部分。在换流过程中,换流器运行需要消耗大量无功功率,为维持交流系统电压稳定并确保换流器正常运行,这一部分无功功率通常由交流滤波器就地补偿。高比例风电直流送出系统如图1所示。

根据直流输电换流器工作原理以及直流输

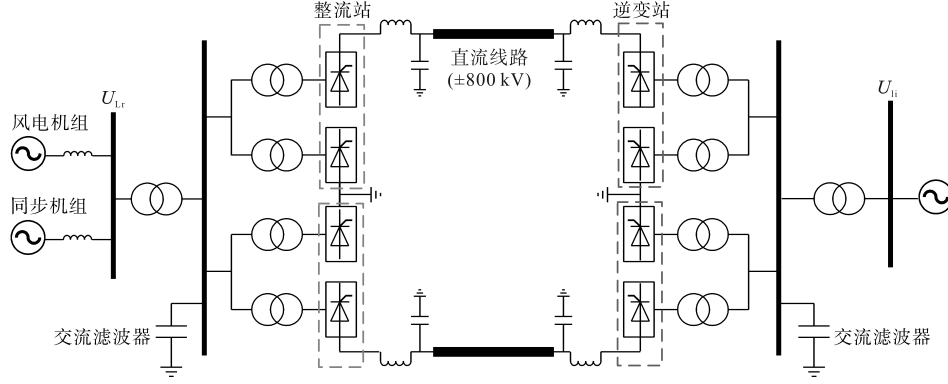


图1 高比例风电直流送出系统

Fig.1 DC transmission system for high penetration of wind power integration

电稳态运行时的模型,直流空载运行时的换流器直流电压可表示为

$$\begin{cases} U_{r0} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} N_r T_r U_{Lr} \\ U_{i0} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} N_i T_i U_{Li} \end{cases} \quad (1)$$

式中: N_r, N_i 分别为整流侧和逆变侧每极所包含的6脉动换流器的数量,通常超高压直流输电为2,特高压直流输电为4; T_r, T_i 分别为整流侧和逆变侧换流站变压器的变比; U_{Lr}, U_{Li} 分别为整流侧和逆变侧两端换流母线的电压。

直流线路带负载运行时两端的直流电压为

$$\begin{cases} U_{dr} = U_{r0} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} N_r X_{cr} I_d \\ U_{di} = U_{i0} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} N_i X_{ci} I_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为整流器的触发角; γ 为逆变器的熄弧角; X_{cr}, X_{ci} 分别为整流侧和逆变侧换相回路的等值电抗; I_d 为直流电流。

直流线路中的电流与两端换流器的直流电压关系为

$$U_{dr} - U_{di} = R_d I_d \quad (3)$$

直流两端的功率可以表示为

$$\begin{cases} P_{dr} = 2U_{dr} I_d \\ P_{di} = 2U_{di} I_d \end{cases} \quad (4)$$

直流两端换流器消耗无功为

$$\begin{cases} Q_r = I_d \sqrt{U_{r0}^2 - U_{dr}^2} \\ Q_i = I_d \sqrt{U_{i0}^2 - U_{di}^2} \end{cases} \quad (5)$$

根据如图1所示高比例直流送出系统示意图,稳态运行时的功率平衡如下式所示:

$$\begin{cases} P_{drN} = P_{acN} = P_{gN} + P_{wN} \\ Q_{drN} = Q_{acN} + Q_{crN} - Q_r = Q_{gN} + Q_{wN} + Q_{crN} - Q_r \end{cases} \quad (6)$$

式中:下标N表示稳态运行。

稳态运行时, Q_r 由 Q_{cr} 就地补偿,直流输送无功功率 $Q_{dr}=0$,由于交直流系统无功平衡,故 $Q_{ac}=Q_{dr}=0$ 。

1.2 换相失败后的直流送端电压稳定问题分析

换相失败是直流输电系统运行中最常见的故障类型,实际工程中主要表现为逆变侧换相失败。当逆变侧换相失败发生时,直流送端换流母线电压会呈现“先低后高”的趋势,如图2所示。

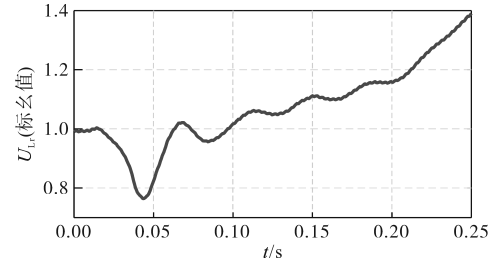


图2 直流送端换流母线电压

Fig.2 DC sending-end converter bus voltage

1)低电压阶段分析:逆变侧换相失败发生时,逆变侧直流电压 U_{di} 会下降到一个很低的值,同一桥臂的上、下两个阀组同时导通导致直流电流迅速上升。因此,在换相失败发生时,直流电压迅速下降,直流电流迅速上升,如图3、图4所示。由式(4)可知,此时直流输送有功功率将大幅减小,如图5所示。由式(5)可知,此时整流站消耗无功功率大幅增加,将从系统吸收大量无功,如图6所示。若送端系统无法及时响应,将由于无功缺额引起送端换流母线处电压下降。

2)过电压阶段分析:直流电压的大幅下降将引发直流系统的低压限流环节动作,导致直流电流迅速减小。此时,逆变侧换相失败逐渐恢复,直流电压重新建立,开始逐渐上升,由式(4)可知,此时直流输送有功功率逐渐上升,如图5所示。由式(5)可知,随着直流电流迅速减小,整流站消耗无功功率大幅减小。然而,此时直流送端

交流滤波器仍然保持正常工作, Q_{cr} 并未减小,将导致直流送端产生无功盈余,如图6所示,进而导致暂态过电压。

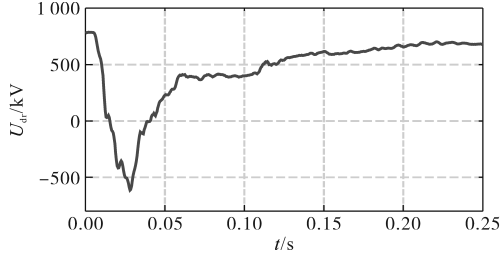


图3 直流电压变化曲线

Fig.3 DC voltage variation curve

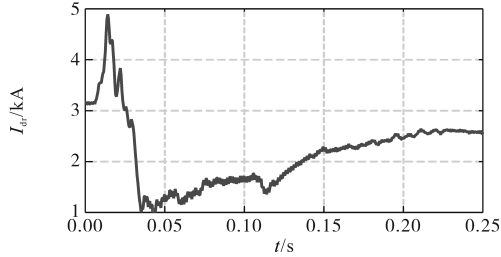


图4 直流电流变化曲线

Fig.4 DC current variation curve

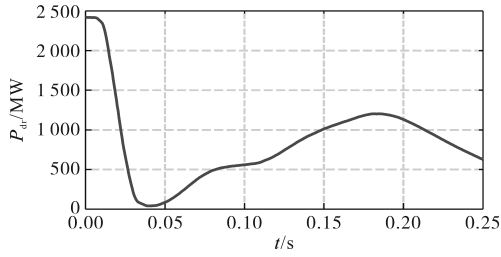


图5 直流输送有功功率

Fig.5 DC active power transfer

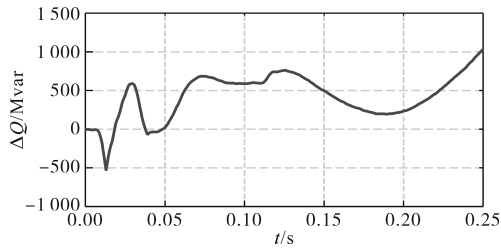


图6 直流送端无功不平衡量

Fig.6 Reactive power imbalance at the DC sending-end

可见,直流换相失败的过程在出现无功不平衡的同时还伴随着直流输送有功功率的大幅波动,在考虑换相失败后直流送端电压问题时,不仅要关注无功功率的协调,还要关注有功功率与直流输送功率的平衡。尤其在风电机接入场景下,风电机组有功出力仅受控制环节控制,若不对风电机组有功出力进行控制,将对暂态电压稳定产生不良影响。因此,本文提出一种考虑直流送端有功、无功功率的基于SAC算法的暂态

电压稳定控制策略,以抑制暂态低电压与过电压。

2 基于SAC算法的暂态电压稳定策略

2.1 SAC的网络结构

SAC算法^[22]是一种基于最大熵的强化学习算法,核心思想在于在传统期望奖励最大化的目标中引入熵正则项,使得智能体在获得高奖励的同时保持充足的探索性和随机性,从而避免过早陷入局部最优解,有效提升训练的稳定性。SAC算法的优化目标为在马尔可夫决策过程下最大化期望奖励与熵的加权和,如下式所示:

$$J(\pi) = \mathbb{E}_{(s_t, a_t) \sim p_\pi} \left\{ \sum_t \beta^t \{ r(s_t, a_t) + \alpha H[\pi(\cdot|s_t)] \} \right\} \quad (7)$$

式中: β 为折扣因子; $r(s_t + a_t)$ 为在状态 s_t 、动作 a_t 下产生的即时奖励; α 为熵系数; $H[\pi(\cdot|s_t)]$ 为在状态 s_t 下的策略熵。

SAC算法采用Actor-Critic结构,包含以下几个关键网络:Actor网络、Critic网络、目标值网络。其中,Actor网络又称策略网络,用于控制智能体生成动作;Actor网络的输入是当前状态 s_t ,输出为一个概率分布,从概率分布中进行采样得到当前动作 a_t ;Critic网络以当前状态 s_t 和当前动作 a_t 作为输入,输出对应的 Q 值,用于评估该状态-动作对的动作价值。为了避免单一 Q 函数对价值产生过高估计的问题,SAC算法采用双 Q 网络结构,在计算时取两个 Q 网络中的较小值,以提升价值估计的稳定性。值函数网络输入为当前状态 s_t ,输出为该状态的长期期望价值 $V_\pi(s)$,同时包含奖励和熵,起到稳定训练的作用。目标值网络则利用软更新方式跟踪值函数网络,以进一步提升训练的稳定性。

SAC算法采用经验回放池存储历史数据,在训练时批量采样进行更新,过程包括四个部分:

1) Critic网络更新。双 Q 函数 $Q_{\theta_1}(s_t, a_t)$ 和 $Q_{\theta_2}(s_t, a_t)$ 网络通过最小化熵正则化贝尔曼残差进行更新,目标是学习准确的熵正则化状态-动作值函数,损失函数如下:

$$J_Q(\theta) = \mathbb{E}_{(s, a, r, s') \sim D} \left\{ \frac{1}{2} [Q_\theta(s, a) - y(r, s')]^2 \right\} \quad (8)$$

其中

$$y(r, s') = r(s, a) + \gamma \mathbb{E}_{a' \sim \pi_\phi} [\min_{j=1,2} Q_{\theta_j}(s', a') - \alpha \log \pi_\phi(a'|s')] \quad (9)$$

式中: s' 为下一时刻状态; a' 为下一时刻动作; π_ϕ

为当前策略; ϕ 为策略网络参数。

梯度更新公式为

$$\theta_i \leftarrow \theta_i - \eta_Q \nabla_{\theta_i} J_Q(\theta_i) \quad (10)$$

式中: θ_i 为第*i*个*Q*网络的参数向量; η_Q 为*Q*网络的学习率; ∇_{θ_i} 为对 θ_i 的梯度算子。

2) Actor网络更新。为了让策略在追求高*Q*值的同时保持随机性,采用最小化KL散度的方式更新策略,损失函数为

$$J_{\pi}(\phi) = \mathbb{E}_{s \sim D} [\mathbb{E}_{a \sim \pi_{\phi}} [\alpha \log \pi_{\phi}(a|s) - \min_{i=1,2} Q_{\theta_i}(s,a)]] \quad (11)$$

式中:*D*为经验回放池。

梯度更新函数为

$$\phi \leftarrow \phi - \eta_{\pi} \nabla_{\phi} J_{\pi}(\phi) \quad (12)$$

式中: η_{π} 为Actor网络的学习率; ∇_{ϕ} 为对策略参数的梯度算子。

3) 熵系数更新。若熵系数采用自适应调节,则需要对熵系数进行更新,熵系数损失函数为

$$J(\alpha) = \mathbb{E}_{a \sim \pi_{\phi}} [-\alpha (\log \pi_{\phi}(a|s) + \mathcal{H}_{\text{target}})] \quad (13)$$

式中: $\mathcal{H}_{\text{target}}$ 为目标熵。

梯度更新公式为

$$\alpha \leftarrow \alpha - \eta_{\alpha} \nabla_{\alpha} J(\alpha) \quad (14)$$

式中: η_{α} 为熵系数的学习率; ∇_{α} 为对熵系数 α 的梯度算子。

4) 目标网络更新。目标网络通过指数移动平均方式进行软更新,以减少*Q*函数训练中的非平稳性问题。软更新公式为

$$\theta'_i \leftarrow \tau \theta_i + (1 - \tau) \theta'_i \quad (15)$$

式中: θ'_i 为目标*Q*网络参数; τ 为软更新系数; θ_i 为当前训练中的*Q*网络参数。

2.2 基于SAC算法的暂态电压稳定策略原理

直流系统故障引发的直流送端暂态电压问题在涉及无功不平衡的同时,还伴随着直流输送有功功率的大幅波动,因此需要有功、无功功率的协调控制。本质上这一控制问题可归结为一个高维、非线性、时变的连续决策过程,过程具有连续状态和动作空间的特征。SAC算法基于Actor-Critic框架,能够直接输出连续的控制动作,有效避免离散化带来的精度误差,以数据驱动的方式处理高维、非线性状态,实现对动态环境的自适应策略,其特性与暂态电压稳定控制问题高度契合,因此,本文提出一种基于SAC算法的暂态电压稳定控制策略。

基于SAC算法的暂态电压稳定策略原理如

下:将直流送端换流母线电压 U_{Lr} 、直流电压 U_{dr} 、直流电流 I_{dr} 作为SAC算法的环境状态, U_{Lr} 、 U_{dr} 、 I_{dr} 以标么值表示,状态由电力系统暂态仿真决定,在SAC算法中不对状态空间施加硬约束。将直流送端风电机组的有功出力指令值 P_{w} 、无功出力指令值 Q_{w} 设置为SAC智能体的动作量,动作空间分别为

$$\begin{cases} Q_{\text{w}} \in [-1, 1] \\ P_{\text{w}} \in [0, \sqrt{1 - Q_{\text{w}}^2}] \end{cases} \quad (16)$$

将当前环境状态*s*输入到SAC智能体中,智能体通过策略网络输出一组动作*a*并施加于电力系统仿真模型。仿真模型执行动作后,向SAC智能体返回下一状态*s'*,同时依据设定好的奖励函数进行计算得到奖励*r*,并将 $[s, a, s', r]$ 作为一组样本存入经验回放池中。以一次完整的暂态仿真作为一个回合,回合结束后从经验回放池中进行批量采样用于训练网络,从而不断优化暂态电压稳定控制策略。

针对直流送端暂态电压可能出现的“先低后高”的动态特性,本文设计奖励函数如下:

$$r = |U_{\text{Lr}}(s') - 1| \cdot \Delta t \cdot k \quad (17)$$

式中: $U_{\text{Lr}}(s')$ 为下一时刻的电压标么值;1为基准电压; Δt 为时间步长;*k*为奖励缩放因子,用于调整奖励量级。

奖励函数以基准电压作为参考,如果下一状态电压比当前状态更接近基准值,则奖励为正,反之奖励为负。奖励函数能够直观地反映动作对暂态电压的改善,同时适用于低电压与过电压场景。

2.3 基于SAC算法的联合仿真平台构建

为实现基于SAC算法的暂态电压稳定策略验证,本文构建了Python+Matlab+PSCAD联合仿真平台,平台充分发挥了三者在算法实现、数据交互与电力系统仿真方面的优势,进而有效验证本文所提基于SAC算法的暂态电压稳定策略。其中,Python用于执行SAC算法流程,Matlab负责数据传递,PSCAD负责产生状态,接收动作并执行暂态仿真,如图7所示。

具体而言,Python用于执行SAC算法流程,包括状态采样、动作生成、经验回放、网络更新、参数软更新等一系列强化学习训练流程。Python会在接收到状态后,生成相应的动作,调用Matlab数据接口将动作传入仿真模型。

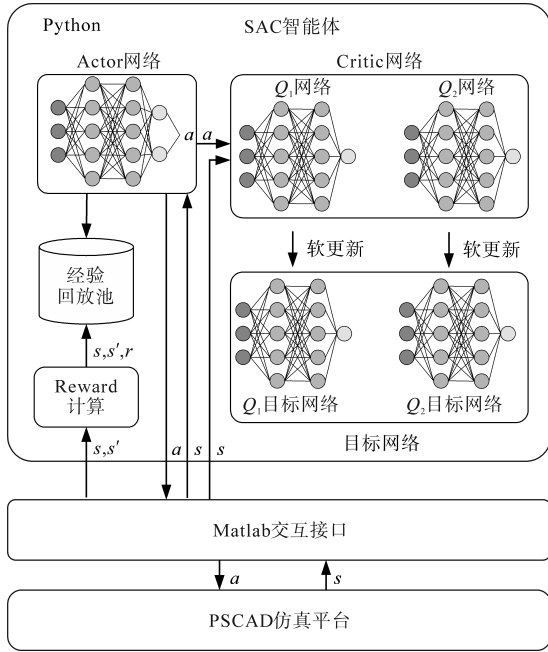


图7 基于SAC算法的联合仿真平台

Fig.7 Co-simulation platform based on the SAC algorithm

Matlab用于充当数据接口,一方面负责接收来自PSCAD的状态量,并将其传入Python,另一方面负责接收来自Python的动作量,并将其传入PSCAD。

PSCAD作为底层仿真平台,将基于详细的电磁暂态仿真模型,接收Matlab写入的控制动作,持续执行暂态仿真,并将下一时刻的状态量传入Matlab,经Matlab传递给Python,从而实现SAC智能体与环境的交互作用,为基于SAC算法的暂态电压稳定策略提供了可靠的验证环境。

2.4 基于SAC算法的暂态电压稳定策略流程

为进一步说明基于SAC算法的暂态电压稳定策略的应用,本文进一步阐述基于SAC算法的暂态电压稳定策略流程,流程可划分为三大步骤,流程图如图8所示。

1) Python环境初始化:在训练开始前,对Python进行环境初始化,包括创建SAC智能体,初始化网络参数,设置训练超参数,构建经验回放池等。

2) 回合经验积累:①PSCAD状态初始化:在每轮仿真回合开始前,对PSCAD中的电气量状态进行初始化,确保每次仿真都从相同状态开始。②状态获取与传递:将PSCAD仿真模型中的状态 s 经Matlab数据接口传递至Python,供SAC智能体进行智能决策。③动作生成与传递:接收到状态 s 后,SAC智能体生成对应动作 a ,经Matlab数据

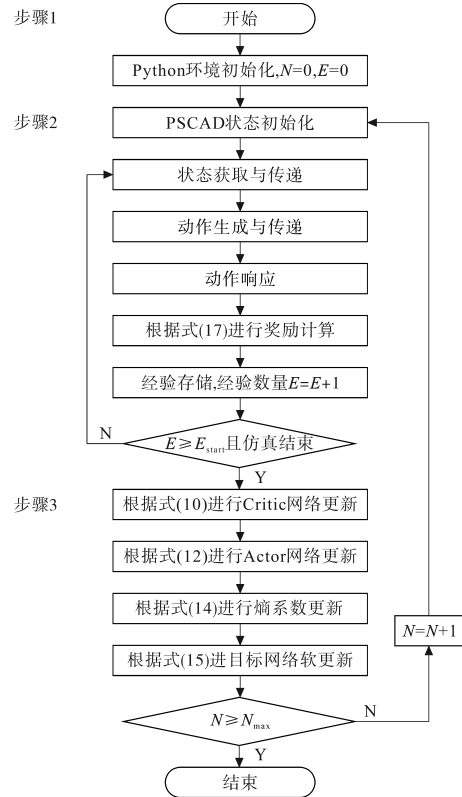


图8 暂态电压稳定控制策略流程

Fig.8 Procedure of transient voltage stability control strategy

接口传递至PSCAD仿真模型进行执行。④动作响应:PSCAD根据动作 a 对风电机组有功、无功出力进行调节,生成下一状态 s' 。⑤奖励计算:依据式(17)所示奖励函数计算奖励,用以评估动作对暂态电压的改善效果。⑥经验存储:将 $[s, a, s', r]$ 作为一组样本存储至经验回放池,为后续训练提供数据支持。⑦训练条件检查:若已结束一轮仿真且经验池中的样本数量达到训练起始条件 E_{start} ,则进入下一步,否则继续进行经验积累。

3) 网络训练与迭代优化:①网络训练:从经验回放池中对样本进行批量采样,依次更新Critic网络,Actor网络,熵系数及对目标网络进行软更新,优化智能体的控制策略。②迭代优化:在每轮训练结束后判断结束条件,若达到规定的最大回合数 N_{max} ,则训练结束。否则再次开启新回合继续迭代优化。

3 仿真验证

3.1 仿真设置

为验证本文所提出的基于SAC算法的暂态电压稳定策略,基于前文所描述的原理,在Python+Matlab+PSCAD联合仿真平台上建立高比例风电直流送出系统仿真模型作为研究对象,模型

结构如图1所示。在训练开始前,需要对SAC算法环境和PSCAD仿真模型分别进行初始化设置,PSCAD仿真模型初始化设置如表1所示,SAC算法的超参数设置如表2所示。仿真起始时,在直流系统受端设置一持续时间为0.1 s的三相短路故障以引发换相失败。

表1 PSCAD初始参数设置

Tab.1 PSCAD initial parameter configuration

参数	数值
U_{dr}	直流送端电压 775 kV
I_{dr}	直流送端电流 3.117 kA
U_{Lr}	直流送端换流母线电压 1(标么值)
P_w	风电机组有功出力 1(标么值)
Q_w	风电机组无功出力 0(标么值)
Δt	时间步长 25 μ s

表2 SAC算法超参数设置

Tab.2 SAC algorithm hyperparameters

参数	数值
η_π	Actor网络学习率 0.000 1
η_Q	Critic网络学习率 0.000 1
η_α	熵系数学习率 0.000 1
τ	软更新系数 0.001
β	折扣因子 0.99
k	奖励缩放因子 1 000
B	批次大小 32
D	经验回放池容量 50 000
$N_{\max}$	最大训练轮次 200
T_{step}	每轮训练步数 20
Δt	时间步长 2.5 ms
W	网络结构 [64, 64]

3.2 仿真结果分析

如图9所示,在训练初期,强化学习奖励值波动较为剧烈,表明算法处于探索阶段,SAC智能体正在尝试不同的动作,以进行高奖励动作的探索。随着训练的逐渐深入,经验样本增加,奖励值逐渐趋于平稳并呈现收敛趋势。在100轮训练后逐渐收敛至-3左右,表明智能体已学习到较优的策略,策略能够有效实现暂态电压稳定控制。

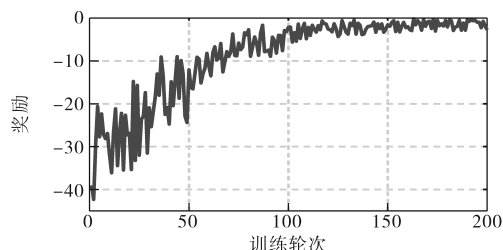


图9 SAC算法训练过程奖励值

Fig.9 Reward value during the SAC training process

图10展示了算法收敛后某次仿真时的直流

送端换流母线电压,图中所示轮次奖励为-3.56,平均电压波动低至0.02(标么值),对暂态低电压与过电压均起到了优秀的抑制作用,展现出了本文所提策略在暂态电压稳定控制上优越的性能。

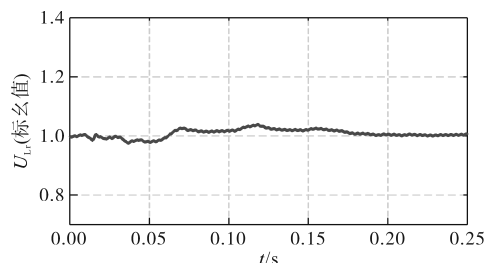


图10 暂态电压控制下的直流送端换流母线电压

Fig.10 DC sending-end bus voltage during transient voltage control

图11~图14展示了暂态电压稳定控制下直流电压、直流电流、风电机组有功指令值、风电机组无功指令值的变化情况。从图中可以看出,在直流系统发生换相失败后,暂态电压稳定控制大致可分为三个阶段:

1)0 s—0.05 s:在故障发生的初始阶段,整流器消耗无功增加,为抑制暂态低电压,风电机组无功指令值增大,增加无功出力以支撑电压。另一方面,此时直流功率大幅降低,若风电机组仍然维持高有功出力,可能导致直流送端有功功率过剩而出现过电压风险,因此,在此阶段控制策略适当降低风电机组有功指令值,降低有功出力以实现有功功率平衡。

2)0.05 s—0.1 s:由于直流系统低压限流环节动作,直流电流在增大后迅速下降,整流器消耗无功功率降低,但此时交流滤波器仍然工作,直流送端将迅速产生无功盈余。为抑制暂态过电压,一方面迅速减小风电机组无功出力,另一方面继续降低风电机组有功出力,以避免有功盈余加剧过电压。

3)0.1 s—0.25 s:在0.1 s时受端故障已清除,换相失败开始恢复。此时,控制策略开始逐步尝试恢复风电机组有功出力,以促进直流系统恢复。同时,为了避免有功恢复过程中产生过电压问题,风电机组仍然保持吸收无功状态,以保证直流系统恢复过程中直流送端电压稳定,避免由于直流送端电压问题再次诱发换相失败,导致连锁故障发生。

3.3 实时性分析

为验证本文所述方法在线应用时的实时性,对已训练完成的SAC模型进行了详细的在线运行性能测试,对1 000次SAC模型决策耗时进行

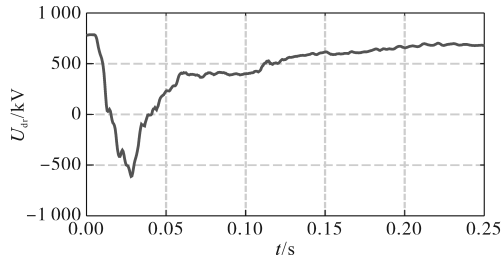


图11 暂态电压稳定控制下的直流电压

Fig.11 DC voltage under transient voltage stability control

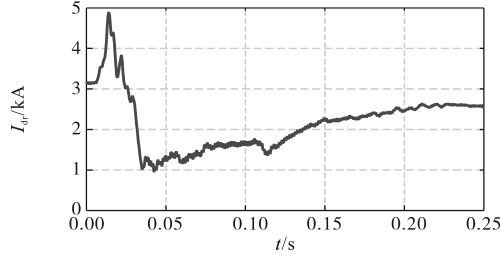


图12 暂态电压稳定控制下的直流电流

Fig.12 DC current under transient voltage stability control

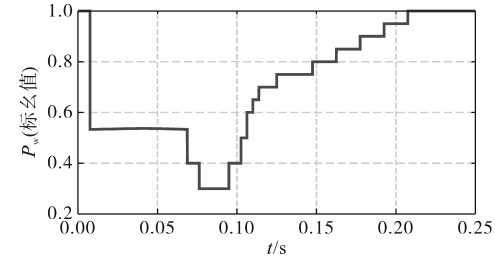


图13 暂态电压稳定控制下的风电机组有功功率指令值

Fig.13 Active power setpoint of wind turbine under transient voltage stability control

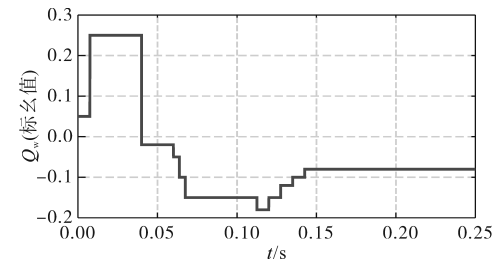


图14 暂态电压稳定控制下的风电机组无功功率指令值

Fig.14 Reactive power setpoint of wind turbine under transient voltage stability control

统计分析,如图15所示。测试结果表明,单次决策的平均执行时间为0.258 ms,标准差为0.035 ms,测试过程中出现的决策时间最大值为0.599 ms,远低于GB/T 19963.1—2021《风电场接入电力系统技术规定》^[23]中规定的风电机组有功、无功电流响应时间要求(≤ 40 ms),满足电力系统实时控制要求。

综上所述,本文提出的基于SAC算法暂态电压稳定控制策略能够根据直流系统动态特性,通过调整风电机组有功、无功出力,有效协调直流

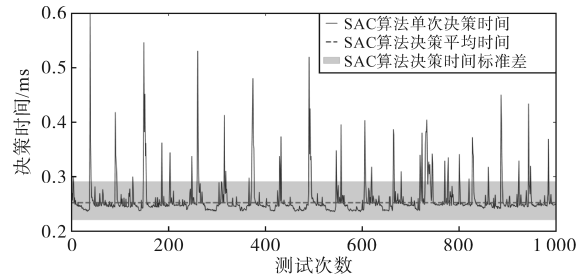


图15 模型实时性能测试结果

Fig.15 Results of model real-time performance testing

送端的有功、无功平衡,进而对暂态低电压、过电压均具有优秀的抑制效果,同时该方法所需算力资源极小,能够满足电力系统实时控制要求,为暂态电压稳定控制提供了一种可行且有效的解决方案。

4 结论

高比例风电接入直流系统为直流送端电压稳定问题带来了新的挑战。直流系统换相失败的过程在出现无功不平衡的同时还伴随着直流输送有功功率的大幅波动,为此,本文提出了一种考虑基于SAC算法的暂态电压稳定控制策略。该策略以直流电压、直流电流与送端换流母线电压为状态量,以风电机组有功、无功出力指令值为动作量,充分考虑了直流系统动态特性与直流送端有功、无功出力的协调配合。同时,设计了一个能够同时兼顾暂态低电压与过电压问题的奖励函数,促进SAC智能体寻找到最优控制策略,能够对暂态低电压与过电压问题均进行有效抑制。本文建立了Python+Matlab+PSCAD的联合仿真平台,验证了利用联合仿真平台生成优化控制策略的可行性,为工程实践奠定了基础。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
Xie Xiaorong, He Jingbo, Mao Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
Zhuo Zhenyu, Zhang Ning, Xie Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 于琳,孙华东,徐式蕴,等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.
Yu Lin, Sun Huadong, Xu Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.
 - [4] 辛保安,郭铭群,王绍武,等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
Xin Baoan, Guo Mingqun, Wang Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
 - [5] 路民辉,王维洲,韩旭彬,等. 特高压直流故障对新能源送端电网暂态过电压作用机理[J]. 智能电网(汉斯), 2021, 11(5): 373-382.
Lu Minhui, Wang Weizhou, Han Xushan, et al. Mechanism of UHVDC fault on transient over voltage of new energy grid[J]. Smart Grid, 2021, 11(5): 373-382.
 - [6] 林圣,兰菲燕,刘健,等. 高压直流输电送端电网暂态过电压机理与抑制策略综述[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 3-16.
Lin Sheng, Lan Feiyan, Liu Jian, et al. Overview of transient over voltage mechanism and suppression strategies of high voltage direct current transmission grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 3-16.
 - [7] 李昂洋,晁璞璞,徐式蕴,等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 26-35.
Li Boyang, Chao Pupu, Xu Shiyun, et al. Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 26-35.
 - [8] 欧阳金鑫,陶睿,潘馨钰,等. 基于不平衡无功与触发角误差补偿的直流输电系统送端交流暂态过电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 53-63.
Ouyang Jinxin, Tao Rui, Pan Xinyu, et al. A suppression method for sending-end transient overvoltage of LCC-HVDC based on the compensation of unbalanced reactive power and firing angle error[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 53-63.
 - [9] Yin C, Li F. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4764-4777.
 - [10] Liang W, Shen C, Sun H, et al. Overvoltage mechanism and suppression method for LCC-HVDC rectifier station caused by sending end AC faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 39(2): 1299-1302.
 - [11] 王奇,董新胜,何山. 抑制高压直流故障引起风电场暂态过电压控制策略[J]. 电气传动, 2024, 54(10): 76-82, 96.
Wang Qi, Dong Xinsheng, He Shan. Control strategy for suppressing transient overvoltage in wind farm caused by HVDC faults[J]. Electric Drive, 2024, 54(10): 76-82, 96.
 - [12] 张建坡,孟凡,吴林林,等. 基于电气参数加权占比的新能源场站分布式调相机容量配置研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4185-4195.
Zhang Jianpo, Meng Fan, Wu Linlin, et al. Research on distributed condenser capacity configuration of new energy field station based on the weighted proportion of electrical parameters index[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4185-4195.
 - [13] 梁卓航,时纯,李岩松,等. 换相失败下STATCOM助增暂态过电压机理与优化策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 66-74.
Liang Zhuohang, Shi Chun, Li Yansong, et al. Mechanism of STATCOM assisting transient voltage under commutation failure at weak sending end system and its optimization strategy [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 66-74.
 - [14] Xue A, Yue L, Zhang J, et al. A new quantitative analysis method for overvoltage in sending end electric power system with UHVDC[J]. IEEE Access, 2020, 8: 145898-145908.
 - [15] 陈厚合,鲁华威,王长江,等. 抑制直流送端系统暂态过电压的直流和风电控制参数协调优化[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 46-55.
Chen Houhe, Lu Huawei, Wang Changjiang, et al. Coordinated optimization of HVDC and wind power control parameters for mitigating transient overvoltage on HVDC sending-side system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 46-55.
 - [16] 穆舟,江波,赵伟,等. 电力系统暂态过电压测量技术综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 1-13.
Mu Zhou, Jiang Bo, Zhao Wei, et al. Reviews on the measurement techniques of transient overvoltage in power system[J]. Electrical Measurement and Instrument, 2022, 59(5): 1-13.
 - [17] Li Y, Zeng Y, Zhang W, et al. Coordinated optimization method for suppressing transient overvoltage caused by HVDC commutation failure considering large wind power integration[J]. Energy Reports, 2023, 9: 1171-1182.
 - [18] 王熙纯,刘纯,林伟芳,等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4612-4621.
Wang Xichun, Liu Chun, Lin Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient over voltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4612-4621.
 - [19] 周莹坤,谢恒,孙华东,等. 新能源机组低电压穿越控制参数对机端工频过电压的影响[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1907-1916.
Zhou Yingkun, Xie Heng, Sun Huadong, et al. Influence of renewable energy low voltage ride-through control parameters on overvoltage[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1907-1916.

(下转第88页)

- Wu Haijiang, Chen Jinrong, Liao Feng, et al. Centralized protection for a grounding fault in a low-resistance grounding distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 141-149.
- [14] 任伟. 小电阻接地系统非稳定性高阻接地故障保护技术[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021: 4-7.
- Ren Wei. Protection technology of unstable high resistance grounding fault in low resistance grounding system[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021: 4-7.
- [15] 许庆强, 许扬, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-94, 115.
- Xu Qingqiang, Xu Yang, Zhou Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94, 115.
- [16] 刘鑫星. 基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障集中式保护[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018: 33-34.
- Liu Xinxing. Centralized protection for grounding fault in low-resistance grounding system based on zero-sequence current comparison[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018: 33-34.
- [17] 邓丰, 徐帆, 冯思旭, 等. 基于行波全波形能量分布特征的高阻接地故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8177-8190.
- Deng Feng, Xu Fan, Feng Sixu, et al. Research on high impedance fault detection method based on energy distribution characteristics of traveling wave full waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8177-8190.

收稿日期: 2025-02-10

修改稿日期: 2025-04-17

(上接第51页)

- 1916.
- [20] Jin X, Nisn H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVDC system under commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10265-10277.
- [21] 严雨豪, 周步祥, 陈实, 等. 双馈风电机组低/高电压复合穿越的控制策略研究[J]. 电气传动, 2022, 52(17): 32-39.
- Yan Yuhao, Zhou Buxiang, Chen Shi, et al. Research on Control strategy for doubly fed induction generator under low/high voltage ride through [J]. Electric Drive, 2022, 52(17): 32-39.
- [22] Duan J, Guan Y, Li S E, et al. Distributional soft actor-critic: off-policy reinforcement learning for addressing value estimation errors[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 33(11): 6584-6598.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准管理委员会. GB/T 19963.1—2021: 风电场接入电力系统技术规定第1部分: 陆上风电[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 19963.1—2021: Technical specification for connecting wind farm to power system—part 1: on shore wind power[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

收稿日期: 2025-09-01

修改稿日期: 2025-10-16